

HEGESZTETT CELLAHÉJ OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE KÖLTSÉGMINIMUMRA

OPTIMUM DESIGN OF WELDED CELLULAR SHELL FOR MINIMUM COST

Dr. Farkas József

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc,
Egyetemváros
altfar@uni-miskolc.hu

Dr. Jármay Károly

Miskolci Egyetem, 3515 Miskolc,
Egyetemváros
jarmay@uni-miskolc.hu

Absztrakt: A konzolos oszlop hajlításra és nyomásra van igénybe véve, valamint az oszlop tetőpontjának vízszintes elmozdulása és hengerhéjas keresztmetszetének átmérője korlátozva van. Az oszlop alsó részét cellahéjjal erősítjük. Kétféle szerkezetváltozatot optimalunk és hasonlítunk össze. Elsőként a merevítetlen körhengerhéjat optimaljuk és azt kapjuk, hogy a héjvastagság olyan nagy, hogy nem alkalmas alakításra és hegesztésre. A másodikként vizsgált cellahéj két koncentrált körhengerhéjból és a közéjük hegesztett hosszabrdákból áll. A cellahéj a cellalemezhez hasonló előnyökkel rendelkezik, vagyis nagy merevséget biztosít kis szerkezeti magassággal. Sima felületük kedvező korrózióvédelem szempontjából. Esztétikai szempontból is előnyösebbek a hosszabrdás változatnál.

Abstract: The cantilever column is subject of bending and compression and the column horizontal deformation at the top is limited. The bottom of the column is reinforced by cellular shell. Two types of structural variants are optimized and compared to each other. First, the unbraced cellular shell is optimized and we found that the shell thickness is too great and it is not suitable for forming and welding. The second variant is the cellular shell consists of two shells and between them circular stiffeners are welded to the shells. The cellular shell structure has the main advantage, that it has high stiffness and small structural weight. The smooth surface is favourable in terms of corrosion resistance. The cellular version is aesthetically also preferred better than the flat stiffener versions.

1. Bevezetés

Előző tanulmányaink azt mutatták, hogy a cellalemezek sok esetben előnyösebbek, mint az egyoldalt bordázottak. Nagy hajlító- és csavaró merevség hozható létre velük kis szerkezeti magasságokkal. Előnyök korrózióvédelem és esztétika szempontjából is [1-5]. A cellahéjak két koncentrikus körhengerhéjból és a közéjük hegesztett hosszabrdákból állnak

(3. ábra). Hosszbordákként előnyösen alkalmazhatók a kettévágott körcső-szelvények (Circular Hollow Section – CHS), mert a külső héjrészek könnyen hozzájuk hegeszthetők. Tanulmányunk célja bemutatni a cellahéj előnyeit az egyoldalas bordázással szemben. Nagy merevsége és kis szerkezeti magassága miatt előnyös hajlított és nyomott oszlopokhoz abban az esetben, ha az oszlop felső pontjának vízszintes elmozdulása erősen korlátozott és a körcsőszelvényű oszlop külső átmérője is korlátozott. Két szerkezetváltozatot hasonlítottunk össze: (a) bordázatlan körhengerhéj, (b) cellahéjas merevítés.

Az optimalizálási ismeretlenek: a belső és külső héj vastagsága, a CHS bordák méretei és száma valamint a merevítés felső pontjának távolsága. A tanulmány bemutatja azt a reális esetet, amikor a cellahéj kisebb vastagságokkal és kisebb költséggel alkalmazható, mint az egyoldalt bordázott héj. Az elmozdulás-korlátozás olyan szigorú, hogy a feszültségi, héjhorpadási és oszlop-kihajlási feltétel passzív. Megjegyezzük, hogy ilyen szigorú elmozdulás-korlátozás gyakran fordul elő szerkezetek földrengésre való méretezésekor. Az összehasonlítás alapja a térfogat- és költség számítás. A költség anyag-, hegesztési és festési költségből áll. Az oszlop alul befogott, az alapozás méretezését és költségeit nem tárgyaljuk.

Adottak: oszlopmagasság $L = 15$ m, biztonsági tényezővel szorzott nyomó erő $N_F = 2 \times 10^7$ [N], vízszintes erő $H_F = 0.1 N_F$, acél-folyáshatár $f_y = 355$ MPa, rugalmassági modulus $E = 2.1 \times 10^5$ MPa. Az elmozdulás-számításnál a vízszintes erőt $\gamma_M = 1.5$ tényezővel osztjuk. Feltételek: az oszlop felső pontja vízszintes elmozdulásának korlátozása és a héjátérő korlátozása $D = 2R = 3000$ mm.

1.1 Merevítetlen héj (1. ábra)

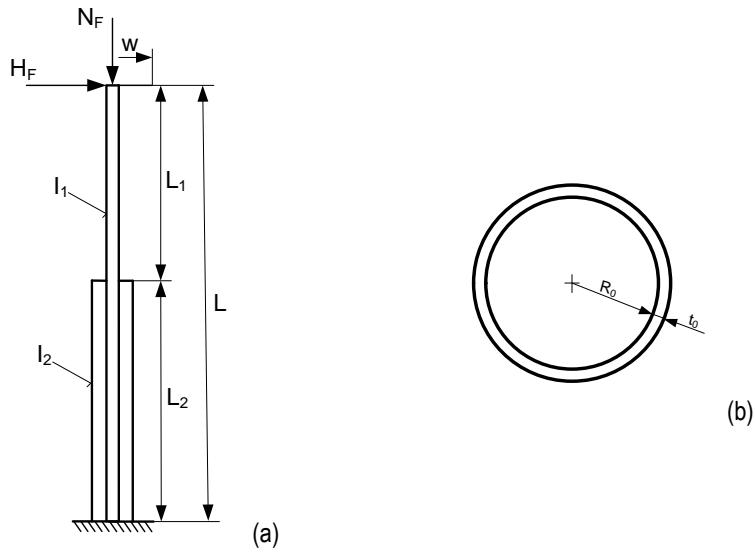
A vízszintes elmozdulás-korlátozás feltétele

$$w_{max} = \frac{H_F}{EI_1 \gamma_M} \left[\frac{(L-L_2)^3}{3} + \mu \left(L - \frac{L_2}{2} \right) (L-L_2) L_2 + \mu \frac{L_2^2}{2} \left(L - \frac{L_2}{3} \right) \right] \leq \frac{L}{1000} \quad (1)$$

ahol

$$\mu = \frac{I_1}{I_2}, \gamma_M = 1.5, I_i = \pi R^3 t_i, i = 1, 2 \quad (2)$$

I_1 és I_2 a felső és alsó oszloprész másodrendű nyomatékai, γ_M biztonsági tényező.



1. ábra. (a) Konzolos oszlop nyomóerővel és vízszintes erővel terhelve. A w vízszintes elmozdulást és a héjátmerőt korlátozzuk; (b) oszlop-keresztmetszet méretei

Az 1. táblázat mutatja a MathCAD programmal végrehajtott szisztematikus keresés eredményeit.

1. táblázat. Az optimalítás néhány eredménye. Méretek mm-ben, a térfogat mm³-ben. A minimális térfogatot dőlt betűvel jelöltük

t_1	t_2	L_2	w	$V \times 10^{-9}$
36	45	12000	15.00	6.107
35	46	9000	14.94	5.881
24	48	9000	14.93	5.429
18	50	9000	14.88	5.316
15	52	9000	15.00	5.254

Látható, hogy mindegyik megoldás héjvastagsága alkalmatlan a gyártásra. Az oszlop-kihajlási feltétel passzív. Ezt a feltételt a 2.4 pontban tárgyaljuk részletesen.

2. Cellahéjjal merevített oszlop (2. és 3. ábrák)

Félbevágott körcső-szelvényű (CHS) [7] bordákat alkalmazunk. Ezek megkönnyítik a külső héjelemek felhegesztését.

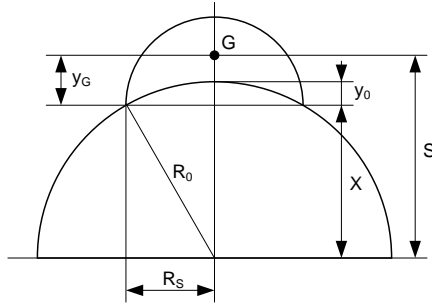
2.1 Geometriai jellemzők

Egy félbevágott CHS keresztmetszeti területe (2. ábra)

$$A_s = \pi R_s t_s, \quad R_s = \frac{D_s - t_s}{2} \quad (3)$$

súlyponti távolsága

$$y_G = \frac{2R_s}{\pi} \quad (4)$$



2. ábra. A cellahéj geometriája

és másodrendű nyomatéka

$$I_s = \frac{R_s^3 \pi}{2} \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \right) \quad (5)$$

Az X távolság

$$X = \sqrt{\left(R_0 + \frac{t_0}{2} \right)^2 - R_s^2} \quad (6)$$

A belső héj sugara

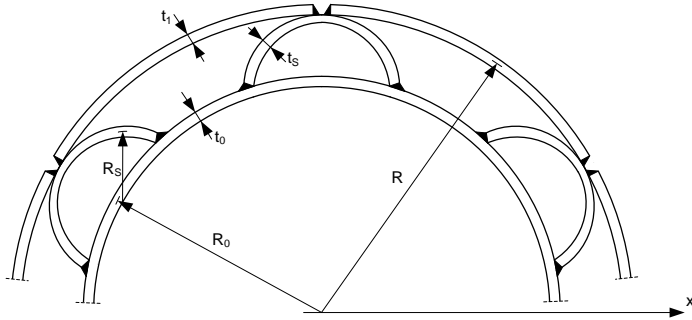
$$R = X + R_s + \frac{t_1 + t_s}{2} \quad (7)$$

(t_1 a külső héj vastagsága)

$$R_0 = \sqrt{\left(R - R_s - \frac{t_1 + t_s}{2} \right)^2 + R_s^2} - \frac{t_0}{2} \quad (8)$$

n_s számú borda másodrendű nyomatéka a héj közepére

$$I_{xs} = \left(I_s + A_s s^2 \right) \sum_{i=1}^{n_s} \cos^2 \left(\frac{2\pi i}{n_s} \right) + \left(\frac{\pi R_s^3 t_s}{2} \right) \sum_{i=1}^{n_s} \sin^2 \left(\frac{2\pi i}{n_s} \right) \quad (9)$$



3. ábra. A cellahéj méretei

A teljes héj másodrendű nyomatéka (3. ábra)

$$I_x = \pi R_0^3 t_0 + \pi R^3 t_1 + I_{xs} \quad (10)$$

Gyártási feltétel a félbevágott CHS belső héjhoz való hegesztésének lehetővé tételére

$$\frac{2R_0\pi}{n_s} - 2R_s \geq 2t_s \quad (11)$$

összefüggésből a bordák maximális száma

$$n_{s,max} = \frac{\pi R_0}{R_s + t_s} \quad (12)$$

2.2 Az oszlop felső pontjának vízszintes elmozdulására vonatkozó feltétel

Ez a feltétel megegyezik a (1)-el, de a (2) megváltozik

$$I_1 = \pi R_0^3 t_1, I_2 = I_x \quad (13)$$

2.3 A külső héjpanelek horpadási feltétele

A Det Norske Veritas [8] képleteit alkalmazzuk

$$\sigma_{max} = \frac{N_F}{A} + \frac{H_F L}{W_x} \leq f_{ks} = \frac{f_y}{\sqrt{1 + \bar{\lambda}^4}}, \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{f_E}} \quad (14)$$

$$f_E = C \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_1}{s_0} \right)^2, C = \psi \sqrt{1 + \left(\frac{\rho_0 \xi}{\psi} \right)^2} \quad (15)$$

$$\psi = 4, \rho_0 = 0.5 \left(1 + \frac{R}{150 t_1} \right)^{-0.5}, \xi = 0.702 Z \quad (16)$$

$$Z = \frac{s_0^2}{R t_1} \sqrt{1 - \nu^2}, \nu = 0.3 \quad (17)$$

Az alkalmazott erős elmozdulás-feltétel esetén a panelhorpadási feltétel passzív. A normál feszültség olyan kicsi, hogy az együttdolgozó héjszélesség megegyezik s_0 -val.

2.4 Oszlop-kihajlási feltétel

Az Euler-féle kritikus feszültség számítására kétrészes oszlop esetén a Timoshenko és Gere [9] képletet használjuk, a hajlított és nyomott oszlop stabilitás-számítását az Eurocode 3 Part 1-1 [10] szerint végezzük

$$\frac{N_F}{\chi_1 A f_y} + k_{yy1} \frac{H_F L}{W_x f_y} \leq 1 \quad (18)$$

$$\chi_1 = \frac{\phi_1 - \sqrt{\phi_1^2 - \lambda^2}}{2\lambda^2}, \phi_1 = 1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2, \lambda = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E}}, \sigma_E = \frac{\pi^2 E I_2}{4 L^2 A C} \quad (19)$$

$$C = \frac{L_2}{L} + \frac{L_1 I_2}{L I_1} - \frac{1}{\pi} \left(\frac{I_2}{I_1} - 1 \right) \sin \frac{\pi L_2}{L} \quad (20)$$

$$\alpha = 0.34,$$

$$k_{yy1} = C_{my} \left(1 + 0.6 \lambda \frac{F}{\chi_1 A f_y} \right) \quad \text{for } \lambda < 1 \quad (21)$$

$$k_{yy1} = C_{my} \left(1 + 0.6 \frac{F}{\chi_1 A f_y} \right) \quad \text{for } \lambda \geq 1 \quad (22)$$

$$C_{my} = 0.6$$

2.5 Költségfüggvény

A bordázatlan körhengerháj gyártása megegyezik a 2.4 pontban leírtakkal, de R és t helyett R_0 és t_0 jelöléseket alkalmazunk.

$$V_1 = 3000 \times 2R_0 \pi t_0, \rho = 7.86 \times 10^{-6} \text{ kgmm}^{-3}, k_F = 1.0 \text{ \$/min}, k_{M1} = 1.0 \text{ \$/kg}. \quad (23)$$

$$K_{F0} = k_F \Theta e^{\mu}, \mu = 6.8582513 - 4.527217 t_0^{-0.5} + 0.009541996 (2R_0)^{0.5} \quad (24)$$

$$K_{F1} = k_F \left[\Theta \sqrt{\kappa \rho V_1} + 1.3 \times 0.152 \times 10^{-3} t_0^{1.9358} (6000 + 2\pi R_0) \right] \quad (25)$$

$$\kappa = 4, V_1 = 2R_0 \pi t_0 \times 3000, \Theta = 2 \quad (26)$$

$$K_{F2} = k_F \left(\Theta \sqrt{25 \rho V_1} + 1.3 \times 0.152 \times 10^{-3} t_0^{1.9358} \times 4 \times 2R_0 \pi \right) \quad (27)$$

A félbevágott CHS bordák hegesztése a belső héjhoz SAW sarokvarratokkal (a SAW hegesztés gazdaságosan alkalmazható hosszvarratokhoz)

$$K_{F3} = k_F \left[\Theta \sqrt{(\eta_s + 1) \rho V_2} + 1.3 \times 0.2349 \times 10^{-3} a_w^2 2L_2 \eta_s \right] \quad (28)$$

$$V_2 = 5V_1 + n_s A_s L_2, \quad a_w = 0.3 t_s \quad (a_{\min} = 3 \text{ mm}) \quad (29)$$

A külső 2 m hosszú héjpanelek alakítása

$$K_{F4} = k_F \Theta e^{\mu_1}, \mu_1 = 6.8582513 - 4.527217 t_1^{-0.5} + 0.009541996 (2R)^{0.5} \quad (30)$$

Egy külső héjpanel hegesztése L_2 hosszban 3 m hosszú κ_3 számú elemből ($\kappa_{30}-1$) számú GMAW-C tompavarrattal

$$K_{F5} = k_F \left(\Theta \sqrt{\kappa_{30} \rho V_3} + 1.3 \times 0.152 \times 10^{-3} t_1^{1.9358} \frac{2R\pi}{n_s} (\kappa_{30} - 1) \right) \quad (31)$$

$$V_3 = \frac{2R\pi t_1 L_2}{n_s} \quad (32)$$

$$\kappa_3 = \frac{L_2}{3000}$$

κ_{30} –ra kerekítve

A külső héjpanelek hegesztése a bordázott héjhoz SAW (fedőporos hegesztés) sarokvarratokkal ($a_{w1} = 0.3t_s$ mérettel)

$$K_{F6} = k_F \left(\Theta \sqrt{(n_s + 1)} \rho V_4 + 1.3 \times 0.2349 \times 10^{-3} a_{w1}^2 2n_s L_2 \right) \quad (33)$$

$$V_4 = V_2 + n_s V_3 \quad (34)$$

Festési költség

$$K_P = k_p S, S = 2\pi R_0 (2L - L_2) + 2R\pi L_2 \quad (35)$$

Anyagköltség

$$K_M = k_M \rho V_4 \quad (36)$$

Teljes költség

$$K = K_M + 5(K_{F0} + K_{F1}) + K_{F2} + K_{F3} + \kappa_{30} K_{F4} + n_s K_{F5} + K_{F6} + K_P \quad (37)$$

2.6 Az optimalás eredményei

Az optimumokat egy MathCAD algoritlussal, szisztematikus kereséssel határoztuk meg. Az eredményeket a 2. táblázat adja meg. A gyártási szempontoknak megfelelően az alábbi határértékeket tartottuk be: $t_{0max} = 30$, $t_{1max} = 30$, $t_{smin} = 10$ mm.

2. táblázat. Az optimalás eredményei. A legnagyobb elmozdulás minden esetben a 15 mm határérték alatt van. Méretek mm-ben, térfogat V mm³-ben. Az optimumokat dőlt betűkkel jelöltük

t_0	t_1	L_2	$V_4 \times 10^{-9}$	K (\$)
25	29	8200	5.641	80260
24	30	8300	5.613	79220
23	30	8700	5.596	78530
22	30	9100	5.578	77570
21	30	9600	5.589	76900
20	30	10200	5.629	76510
19	30	10800	5.688	76140
18	30	11600	5.766	76320

A számértékek az alábbiakat mutatják.

- A minimális térfogat és költség a minimális bordaszám ($n_s = 4$) esetén adódnak,
- az optimumok minimális D_s , maximális R_0 és t_s értékekhez tartoznak, ezért választottuk a 101.6x10 CHS profilt. A minél nagyobb másodrendű nyomaték elérése céljából a maximális $t_1 = 30$ mm-t választottuk,
- a minimális térfogatot illetve költséget különböző méretek adják, mert a gyártási költségek jelentősek.

3. Következtetések

Kétféle szerkezet-változatot optimaltunk.

- (1) A merevítettlen körhengerháj minimális térfogata $V = 5.316 \times 10^9 \text{ mm}^3$, de a hájvastagság 50 mm, ami gyártásra alkalmatlan,
- (2) a cellahéjjal erősített oszlopnál $V = 5.578 \times 10^9 \text{ mm}^3$ és $K = 76150 \text{ \$}$, hájvastagság 30 mm.

A vizsgált esetben a cellahéjjal merevített oszlop minden feltételt kielégít. A számítás mutatja, hogy milyen előnnyel jár a cellaháj használata, illetve hogy az optimalás elengedhetetlen a hegesztett szerkezet kedvező kialakításához.

Köszönetnyilvánítás

A kutató munka az OTKA T 109860 projekt támogatásával valósult meg, a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovatív járműipari, gépészeti és energetikai tervezés és technológiák Kiválósági Központ keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] Farkas, J., Structural synthesis of welded cell-type plates. Acta Techn. Hung. 1976, 83, No. 1-2, 117-131.
- [2] Farkas, J., Optimum design of metal structures, Akadémiai Kiadó, Budapest, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1984.
- [3] Farkas, J., Jármái, K., Analysis and optimum design of metal structures. Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1997.
- [4] Farkas, J., Jármái, K., Design and optimization of metal structures, Horwood, Chichester, UK, 2008.
- [5] Farkas, J., Jármái, K., Optimum design of steel structures, Springer, Heidelberg etc., 2013.
- [6] Jármái, K., Farkas, J. Cost calculation and optimization of welded steel structures. J Constr Steel Res, 1999, 50, 115-135.
- [7] EN 10219-2. Cold formed circular hollow section profiles. CEN 2006.
- [8] DNV Det Norske Veritas, Buckling strength of shells. Recommended practice RP-C202. Høvik, Norway, 2002.
- [9] Timoshenko, S.P., Gere, J.M. Theory of elastic stability. McGraw Hill. New York-Toronto-London, 1961.
- [10] MSZ EN 1993-1-1. Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-1. rész (2009): Általános és az épületekre vonatkozó szabályok.